

warstwa powierzchniowa,
oczyszczanie laserowe,
lutowanie, klejenie, spawanie

Wojciech NAPADŁEK¹
Leszek BAKAŁA²

WYBRANE APLIKACJE OCZYSZCZANIA LASEROWEGO STALI STOPOWYCH CHROMOWO-NIKLOWYCH

W artykule przedstawiono istotę laserowego oczyszczania i teksturowania warstw powierzchniowych materiałów konstrukcyjnych, głównie stali stopowych chromowo – niklowych, stosowanych w produkcji elementów maszyn poddawanych lutowaniu, spawaniu lub klejeniu. Zaprezentowano niektóre wyniki badań laboratoryjnych dotyczących topografii i czystości powierzchni przed i po ablacyjnej mikroobróbce laserowej. W wyniku przeprowadzonych badań, stwierdzono występowanie szeregu zanieczyszczeń organicznych oraz nieorganicznych powstałych w wyniku produkcji elementów lub będących efektem oddziaływania środowiska, w tym czynnika ludzkiego. Po próbach laboratoryjnych oczyszczania i teksturowania laserowego uzyskano bardzo dobry efekt czystości i rozwinięcia powierzchniowego, co rokuje dobre perspektywy technologiczne, w ww. procesach.

CHOSEN APPLICATIONS OF LASER CLEANING OF CHROMIUM-NICKEL ALLOY STEELS

In this article laser cleaning and texturing of superficial chromium-nickel alloy steel layers applied in the machine elements subjected sticking, welding and soldering is presented. Some laboratory results of topography and surface purity before and after laser ablation microprocessing are presented. Occurrence of organic and inorganic dirt formed as a result of the elements production or being the effect of the human factor influence was affirmed in the result of conducted investigations. The very good effect of superficial cleanliness and surface development which are good technological perspectives, was got after laser cleaning tests.

1. WSTĘP

Współczesna technologia rozwija się w bardzo szybkim tempie i dlatego problem czystości powierzchni jest bardzo istotnym elementem, zwłaszcza w przemyśle motoryzacyjnym. Procesy technologiczne kształtują technologiczną warstwę wierzchnią w

¹ dr inż. Wojciech NAPADŁEK, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, tel. (0-22) 683-73-57, tel/fax 683-76-02, e-mail: wnapadlek@wat.edu.pl

² mgr inż. Leszek BAKAŁA, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, ul. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: lbakala@wat.edu.pl

różnych elementach (np. elektroniki, techniki motoryzacyjnej, lotnictwie i innych). Właściwe przygotowanie technologiczne powierzchni różnych materiałów (metalowych, kompozytowych, ceramicznych itp.), a szczególnie w zakresie ich czystości, ma decydujący wpływ na uzyskanie wymaganej przyczepności podczas procesu klejenia, lutowania spawania oraz innych. Wiele stosowanych metod powoduje zanieczyszczenie i skażenie środowiska. Promieniowanie laserowe umożliwia czyszczenie nawet najdelikatniejszych powierzchni bez istotnego wpływu na środowisko bądź zdrowie ludzkie.

Tradycyjne metody oczyszczania, np. piaskowanie bądź wykorzystanie wody pod ciśnieniem z dodatkiem różnego rodzaju ścierniw usuwają nawarstwienia w sposób mechaniczny. Istnieją również metody konkurencyjne takie jak usuwanie zanieczyszczeń metodami chemicznym (np. wytrawianie, anodowanie w kwasie siarkowym, chromowym) lub za pomocą ultradźwięków. Są to jednak metody szkodliwe dla środowiska.

W celu efektywnego, skutecznego i mniej pracochłonnego oczyszczania z dużą precyzją i powtarzalnością wykorzystanie promieniowania laserowego staje się niezastąpione. W niektórych przypadkach jest to jedyna skuteczna metoda [1-7].

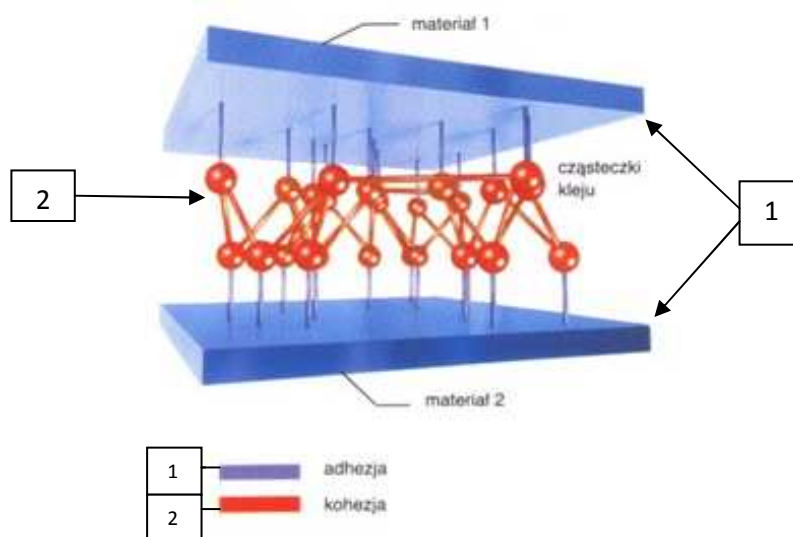
2. METODY PRZYGOTOWANIA WARSTWY POWIERZCHNIOWEJ MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH W PROCESACH TECHNOLOGICZNYCH KLEJENIA

Klej jest substancją, która wprowadzona między powierzchnie przylegające dwóch elementów, wykonanych z takich samych lub różnych materiałów, umożliwiającą trwałe ich połączenie w procesie klejenia. Kleje są zaliczane do materiałów czynnych powierzchniowo (podobnie jak farby, lakiery i detergenty), których cechą charakterystyczną jest zwiększanie adhezji.

Łączenie metali za pomocą klejenia jest coraz częściej stosowane ze względu na dużą wytrzymałość połączenia, minimalne naprężenia w złączu oraz niskie koszty tej technologii. Zaletami połączeń klejonych są ponadto zdolność tłumienia drgań, oraz brak efektów cieplnych, występujących zwykle podczas łączenia metali innymi metodami. Wadą połączeń klejonych jest ich stosunkowo mała odporność na wzrost temperatury otoczenia (maleje wówczas wytrzymałość połączenia), stosunkowo mała adhezja (od kilku do kilkudziesięciu MPa), głównie przy występowaniu cyklicznie zmiennych obciążeń zginających, skręcających. Metodą klejenia łączyć można ze sobą nie tylko metale i stopy, ale także metale z niemetalami, metale z tworzywami sztucznymi, szkłem, porcelaną, tkaninami i innymi materiałami. Klejenie metali jest stosowane w produkcji nowych wyrobów oraz w naprawie maszyn i urządzeń. Połączenia klejone metali są obecnie stosowane w konstrukcjach lotniczych, pojazdach samochodowych, taborze kolejowym i wielu innych maszynach i urządzeniach. Tradycyjny proces klejenia zaczyna się od oczyszczenia powierzchni metodami chemicznymi lub mechanicznymi. Powierzchnie łączone powinny być wolne od zanieczyszczeń i odpowiednio rozwinięte, aby szczelnie do siebie przylegały. Niewłaściwe oczyszczenie znacznie zmniejsza wytrzymałość połączenia, dlatego istotna jest optymalizacja w zakresie rozwinięcia warstwy powierzchniowej. Powierzchnie łączone przygotowuje się najpierw mechanicznie, a następnie chemicznie. Przygotowanie mechaniczne ma na celu usunięcie zanieczyszczeń znajdujących się na powierzchni łączonych materiałów jak na przykład korozji oraz rozwinięcie powierzchni,

co znacznie zwiększa adhezję mechaniczną. Przygotowanie chemiczne polega na wytrawieniu powierzchni łączonych, aby zwiększyć zwilżalność łączonych materiałów.

Podczas klejenia występuje zjawisko adhezji (rys.1). Jest to łączenie się ze sobą powierzchniowych warstw ciał fizycznych lub faz (stałych, ciekłych). Adhezji nie należy mylić z kohezją (spójność kompozytu klejowego rys.1), która jest zjawiskiem związanym z oddziaływaniami międzycząsteczkowymi występującymi "w głębi" a nie na powierzchni danego ciała. Adhezja wynika z oddziaływań międzycząsteczkowych stykających się substancji. Granicznym przypadkiem odróżniającym adhezję od reakcji chemicznej jest powstanie w łączonej warstwie nietrwałych wiązań chemicznych. Granica między adhezją i zjawiskami powierzchniowymi zachodzącymi pod wpływem tworzenia się wiązań chemicznych jest bardzo płynna. Np. trudno jest jednoznacznie rozróżnić "czystą adhezję" od adhezji na skutek tworzenia się słabych wiązań wodorowych, które są jednocześnie rodzajem wiązań chemicznych i oddziaływaniami międzycząsteczkowymi. W praktycznych, inżynierskich badaniach (np. skuteczności działania klejów), przez adhezję rozumie się siłę połączenia dwóch warstw klejonego materiału bez wnikania w naturę oddziaływań powodujących powstanie trwałej spoiny. Miarą adhezji jest praca przypadająca na jednostkę powierzchni którą należy wykonać aby rozłączyć stykające się ciała [10].



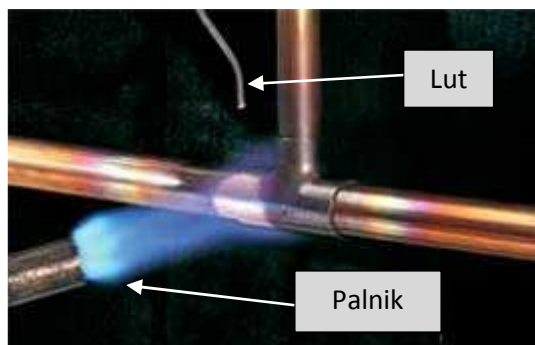
Rys. 1. Siły oddziaływujące na materiały klejone [8]

W dzisiejszej erze nowoczesnych technologii warto by zastąpić tradycyjne metody przygotowania powierzchni (mechaniczne, chemiczne), bardziej nowoczesnymi, wydajnymi i ekologicznymi. Do takich zaliczamy technologię ablacyjnego oczyszczania laserowego, która może z dużym powodzeniem zastąpić ww. tradycyjne metody lub je skutecznie wspomagać. Jest to technologia bardzo bezpieczna i skuteczna. Zapewnia ona stopień najwyższego oczyszczenia powierzchni klejonych które często przenoszą bardzo duże obciążenia i muszą być wytrzymałe na ścinanie i odrywanie. Oczyszczenie

powierzchni metodami tradycyjnym takimi jak: oczyszczanie chemiczne czy piaskowanie jest niebezpieczne dla zdrowia poprzez opary odczynników czy mikrodrobinki piasku dostające się do płuc czy przewodu pokarmowego. Bardzo interesujące i mogące dać duży skok technologiczny wydaje się zastosowanie tzw. teksturowania laserowego, czyli zaplanowanego technologicznie rozwijania warstwy powierzchniowej w celu zwiększenia adhezji mechanicznej.

3. METODY PRZYGOTOWANIA WARSTWY POWIERZCHNIOWEJ MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH W PROCESACH TECHNOLOGICZNYCH LUTOWANIA

Lutowaniem nazywamy metodę spajania metali polegającą na wprowadzaniu między łączone powierzchnie innego roztopionego materiału dodatkowego (metal lub stopu), nazywanego lutem (rys.2). Podczas lutowania części łączone nagrzewają się, lecz nie topią się w miejscu łączenia. Połączenie trwałe uzyskuje się dzięki przyczepności lutu (dyfuzji) do materiałów łączonych, dlatego warunkiem otrzymania prawidłowego połączenia jest starannie oczyszczona (mechanicznie i chemicznie) powierzchnia lutowana.



Rys.2. Poglądowy rysunek lutowania [11]

Lutowanie jest jednym z najstarszych sposobów łączenia metali. Jest jedną z nielicznych metod umożliwiających łączenie ze sobą metali, stopów, kompozytów o różnych właściwościach. Lutowanie jest jedyną metodą zapewniającą połączenia właściwej jakości. Największe zastosowanie znajduje ono w przemyśle elektrotechnicznym, elektronicznym, telekomunikacyjnym do łączenia przewodów elektrycznych, stosowana jest także w lotnictwie i przemyśle samochodowym. Jest stosowane szczególnie do lutowania blach ocynkowanych, np. w produkcji rynien, do zamykania blaszanych puszek z konserwowanymi produktami spożywczymi. Ponadto lutowanie stosuje się w przemyśle samochodowym, np. podczas prac blacharskich przy łączeniu elementów, wypełnianiu wgłębień, wykonywaniu i naprawie chłodnic samochodowych, łączeniu uzwojeń silników elektrycznych, a także w naprawach pękniętych odlewów. Połączenia lutowane dobrze przewodzą prąd i dlatego są stosowane zamiast spawania w przypadkach, gdy spoiny nie

muszą przenosić dużych obciążeń, ale powinny zapewnić dobrą szczelność i przewodzenie prądu. Rozróżnia się lutowanie lutami miękkimi, twardymi, specjalnymi, lutowanie.

Większość metali i stopów reaguje z otaczającą je gazową atmosferą i tworzy na powierzchni warstewkę trudno topliwych, niemetalicznych związków tlenu, azotu, wodoru, itp. Intensywność tego procesu wzrasta wraz ze wzrostem temperatury. Wymaganą czystość łączonych powierzchni i lutu zapewniają przy lutowaniu substancje zwane topnikami. Topniki chronią powierzchnię przed utlenianiem. Własności ich zależą od : własności zwilżających lut. Powierzchnia metalu lutowanego będzie dobrze zwilżona przez lut gdy będzie tworzyć szczelną błonę (a nie krople). Zależy to od:

- napięcia powierzchniowego, współczynnika zwilżania, temperatury, stanu powierzchni, ilości zanieczyszczeń;
- własności kapilarnych złącza czyli zdolność lutu do wypełniania szczelin (zależy od włoskowatości, gęstości, temp. , zwilżania, wielkości szczeliny);
- dyfuzji czyli zdolności cząsteczek do przenikania się (zależy od stopnia nagrzania, czasu, przewodności cieplnej oraz stanu powierzchni).

Podobnie jak w klejeniu również podczas lutowania przygotowanie materiału polega na oczyszczeniu go mechanicznie i chemicznie. Działanie chemiczne polega na odtłuszczeniu lub trawieniu. Odtłuszczenie wykonuje się za pomocą rozpuszczalników organicznych, roztworów alkalicznych, elektrolitycznie lub ultradźwiękowo, w zależności od kształtów i zanieczyszczeń. Trawienie odbywa się za pomocą wodnych roztworów kwasów (siarkowego, solnego, azotowego). Po trawieniu należy zwilżone powierzchnie zobjętnić, używając wody. Bardzo interesującym może być wykorzystanie oczyszczania laserowego i teksturowania zamiast obróbki mechanicznej. Technologia ta jest o wiele bardziej nowoczesna, wydajna oraz ekologiczna i bezpieczna. Może ona zastąpić lub wspomagać oczyszczanie mechanicznie [10].

4. METODY PRZYGOTOWANIA WARSTWY POWIERZCHNIOWEJ MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH W PROCESACH TECHNOLOGICZNYCH SPAWANIA

Spawanie jest to trwałe połączenie części przedmiotów przez miejscowe roztopienie powierzchni stykowych z dodawaniem lub bez dodawania spoiwa. Rozróżnia się spawanie: gazowe, elektryczne (łukowe) oraz rzadziej stosowane termitowe, elektronowe, laserowe. Występuje w procesie łączenia metali (głównie stali) oraz tworzyw sztucznych. Przy spawaniu zwykle dodaje się spoiwo (materiał dodatkowy) stapiające się wraz z materiałem podstawowym, aby utworzyć spoinę i polepszyć jej własności użytkowe. Przy spawaniu w przeciwieństwie do zgrzewania nie stosuje się dociskania do siebie łączonych elementów.

Spawanie stosuje się w budowie maszyn obecnie do łączenia zarówno stali, staliwa i żeliwa (najtrudniejsze do spawania), jak i stopów lekkich. W procesach tych należy zwrócić szczególną uwagę również na stan czystości oraz wpływ zanieczyszczeń (tlenków, zgorzelin) na stabilność procesów spawania.

Przygotowanie powierzchni jest niezwykle ważne, aby wszystkie powierzchnie metalu, które będą łączone były wolne od korozji, zanieczyszczeń, zgorzeli hutniczej, oleju i lakieru. Jeżeli powierzchnie nie zostaną właściwie oczyszczone, spoina może być porowata i krucha. W celu uzyskania właściwej czystości w strefie spawania, należy usunąć warstwę

utlenioną i zanieczyszczenia np. przy pomocy szczotki drucianej. Należy także usunąć olej i zatłuszczone strefy, za pomocą środka odtłuszczającego.

Podczas spawania elementów maszyn o dużej grubości ścianek należy nałożyć kilka ściągów spoiny. Po nałożeniu każdego ścięgu należy przeprowadzić oczyszczanie międzyoperacyjne, najczęściej metodą mechaniczną (np. szczotką drucianą, tarczą szlifierską). Metody te nie są jednak wystarczająco skuteczne, gdyż trudno jest usunąć mikrozanieczyszczenia w trudnodostępnych strefach. Ablacyjne oczyszczanie laserowe wydaje się najlepszą alternatywą w tym procesie. Dla zwiększenia skuteczności, celowym byłoby zastosowanie wstępnego oczyszczania mechanicznego z następującym po nim oczyszczaniu laserowym. Efektywność procesu hybrydowego oczyszczania byłaby bardzo duża. Czystość powierzchni uległaby również znacznej poprawie [12].

5. LASEROWE OCZYSZCZANIE I TEKSTUROWANIE WARSTWY POWIERZCHNIOWEJ

Laserowe oczyszczanie i teksturowanie warstwy powierzchniowej materiałów konstrukcyjnych i elementów maszyn oparte jest na zjawisku ablacji laserowej. Ablacja laserowa jest to bardzo szybkie odparowanie warstwy wierzchniej różnego rodzaju materiałów: metali, ceramik, tworzyw sztucznych i innych w wyniku oddziaływania impulsu laserowego o dużej gęstości mocy przy bardzo krótkim czasie oddziaływania (od mikro- do pikosekund). Proces ablacji występuje w trakcie trwania impulsu laserowego. W wyniku oddziaływania promieniowania laserowego na warstwę powierzchniową materiałów konstrukcyjnych (pochłanianie i rozpraszanie) z wyrzucaniem materiału (w postaci pary i cieczy). W wyniku napromienienia powierzchni materiałów za pomocą impulsu promieniowania laserowego zachodzą takie zjawiska jak: absorpcja promieniowania, zjawiska cieplne lub fotochemiczne. Szczegółowy opis procesu ablacji przedstawiono w pracach [2-7].

W procesie fotoodrywania brane są pod uwagę trzy zasadnicze siły, które powodują przyczepianie cząsteczki do powierzchni: siła kapilarna, siła Van der Waalsa oraz siła elektrostatyczna. Do pokonania sił przylegania cząsteczek do podłoża bez uszkodzenia powierzchni coraz częściej stosuje się czyszczenie wiązką laserową z wykorzystaniem reakcji fotomechanicznej. W wyniku intensywnej absorpcji promieniowania laserowego w warstwie przypowierzchniowej w której mogą występować zanieczyszczenia (tlenki, korozja, patyna, tłuszcze, oleje, farby, lakiery i inne organiczne i nieorganiczne składniki) jako jej skutek pojawia się silny i gwałtowny wzrost temperatury. Transport energii do wnętrza materiału, gdzie promieniowanie laserowe nie dociera następuje poprzez powstającą plazmę w wyniku konwekcji i elektronowego przewodnictwa cieplnego. Powstaje w wyniku tego granica zwana frontem ablacji, na której występują silne gradienty gęstości i temperatury plazmy. Front ablacji oddziela dwa obszary, w których kierunki ruchu materii są przeciwne. Z obszaru znajdującego się bliżej powierzchni zewnętrznej następuje „ucieczka” nagrzanego materiału w kierunku prostopadłym do oświetlanej powierzchni, natomiast w obszarze drugim ruch materii jest skierowany w głąb podłoża. Jeśli zanieczyszczona warstwa jest bardzo cienka, fala uderzeniowa po odbiciu się od powierzchni podłoża warstwy granicznej (międzyfazowej) zmienia kierunek propagacji, zwielfokrotniając efekt wyrzucania zanieczyszczających cząsteczek. W przypadku gdy usuwana warstwa jest gruba, wystąpi przejście fali uderzeniowej w falę dźwiękową

powodującą drgania litego podłoża w miejscu oświetlanym, powodując jednocześnie zwielokrotnienie efektu czyszczenia. Po usunięciu warstwy zanieczyszczonej lita powierzchnia jest automatycznie chroniona przed wszelkimi dalszymi uszkodzeniami w związku z tym, że nie istnieje już granica ośrodków faz; fala uderzeniowa nie jest już odbijana lecz pochłaniana przez podłoże. Oczywiście jesteśmy w stanie kontrolować zdejmowanie jednej warstwy po drugiej, gdyż głębokość frontu ablacji zależy przede wszystkim od długości fali promieniowania laserowego i waha się od 0,3 do 1 mikrometra. Należy również pamiętać o odpowiednim doborze parametrów promieniowania laserowego. Dodatkowym atutem jest to, iż możemy w sposób płynny regulować parametrami wiązki laserowej, tzn. czasem trwania impulsu, szczytową gęstością mocy i częstotliwością repetycji. Ważnym elementem jest fakt, że dostarczona gęstość mocy powinna być na tyle duża, aby w sposób gwałtowny wytworzyć szybki przepływ ciepła do cząstki lub podłoża materiału i na tyle niska by nie przekroczyć progu uszkodzenia powierzchni samego materiału. Oczyszczanie warstwy powierzchniowej może zachodzić w środowisku mokrym lub też suchym [2-7].

Zastosowana metoda oczyszczania warstwy powierzchniowej powinna usunąć wszelkiego rodzaju zanieczyszczenia, jak: zabrudzenia organiczne i nieorganiczne, wtrącenia niemetaliczne, tlenki na powierzchni elementów w celu przygotowania ich powierzchni do ww. procesów. Efektem końcowym planowanych prac będzie zwiększenie czystości technologicznej warstwy powierzchniowej stopu Fe - C. Unikatowe własności promieniowania laserowego powodują, że obróbka ta może być realizowana w sposób selektywny w precyzyjnie wybranym obszarze, zwłaszcza w nowoczesnych systemach wyposażonych w automatykę przemysłową i sterowanie. Można obrabiać powierzchnie trudno dostępne oraz o dużej krzywiznie. Ponieważ metody laserowe są bezkontaktowe, możliwe jest ich zastosowanie również do obróbki materiałów toksycznych lub promieniotwórczych. Odmiennie charakterystyki plazmy (temperatura, ciśnienie, czas trwania i skład chemiczny) wytwarzanej przez takie urządzenia jak lasery (CO_2 , Nd: YAG, ArF), powodują, że wyniki obróbki są w każdej metodzie inne, co podkreśla uniwersalność proponowanego zakresu prac i determinuje obszary możliwych zastosowań każdej z metod.

6. CEL I METODYKA BADAŃ

Głównym celem przeprowadzonych badań wstępnych było określenie przydatności nowoczesnej technologii oczyszczania laserowego stali stopowych chromowo-niklowych, np. typu AMS 5504 poddawanych procesom technologicznym lutowania, spawania lub klejenia, dla uzyskania metalicznie czystej, wolnej od zabrudzeń i wtrąceń warstwy powierzchniowej.

Głównym celem przeprowadzonych w WAT badań laboratoryjnych było oczyszczanie warstwy powierzchniowej z tlenków, osadów organicznych i nieorganicznych oraz teksturuwanie warstwy powierzchniowej na stali chromowo niklowej AMS 5504. Stal ta ma szerokie zastosowanie technologiczne w przemyśle lotniczym, samochodowym oraz spożywczym. Elementy wykonane z tej stali łączone są ze sobą w procesach lutowania, zgrzewania, spawania oraz klejenia. W procesie oczyszczania laserowego zastosowano specjalistyczny laser impulsowy Nd: YAG. W badaniach stosowano długość $\lambda = 1064 \mu\text{m}$, gęstość energii $E=0,5\text{-}2\text{J}/\text{cm}^2$ czas trwania impulsu $\tau = 5\text{-}25 \text{ ns}$ oraz częstotliwość repetycji

1-10Hz. Badania wykonano w IOE WAT. W artykule przedstawiono wybrane wstępne wyniki z badań laboratoryjnych. Do obserwacji oczyszczonej warstwy powierzchniowej zastosowano skaningową mikroskopię skaningową (SEM). Charakterystyczne efekty oczyszczania laserowego stali chromowo - niklowej AMS 5504 przy dobranych najlepszych parametrach przedstawione są na rys.3.

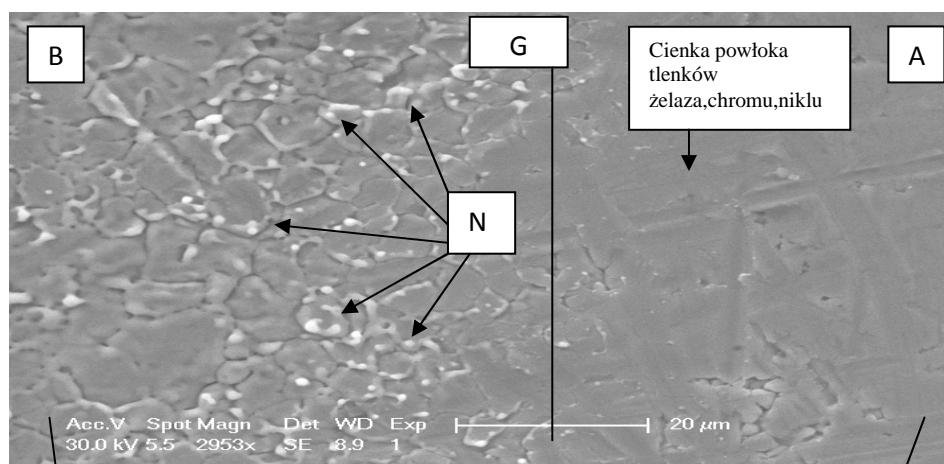
Analizując topografię powierzchni z wykorzystaniem mikroskopii optycznej stereoskopowej oraz elektronowej (SEM) zaobserwowano bardzo korzystny efekt usuwania warstwy tlenków zalegających na powierzchni (rys.3 a, c) blachy wytworzonej technologią walcowania. Tlenki te utrudniają m.in. łączenie się z klejem, lutem. Zaburzają również proces spawania.

Stosując dobraną gęstość energii ok. $1\text{J}/\text{cm}^2$ przy czasie trwania impulsu ok. 10 ns uzyskano najlepsze efekty oczyszczania powierzchniowego bez wyraźnych śladów mikronadtopień powierzchniowych. Aby równomiernie oczyścić warstwę powierzchniową blach wykonanych z AMS 5504 modyfikowaną laserowo, wykorzystano zautomatyzowane stanowisko w skład którego wchodził: laser Nd:YAG, stół x-y sterowany numerycznie, stacja komputerowa z oprogramowaniem sterującym. Zmieniając prędkość przemieszczania V w zakresie 0,5-3m/min, stosowano stopień pokrycia wiązki laserowej (zachodzenie na siebie kolejnych stref naświetlanych laserowo) ok. 10% przy stałej repetycji 10Hz.

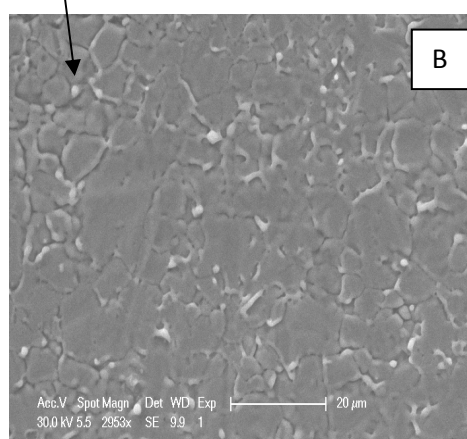
W wyniku usunięcia warstwy tlenków i innych zanieczyszczeń odsłonięta została charakterystyczna dla tej stali ziarnista budowa mikrostruktury austenitycznej o wysokiej czystości (rys.3a, b). Daje to wysokie szanse na uzyskanie wysokiej adhezji np. tworzywa klejowego, dobrej zwilżalności i dyfuzji lutu oraz gwarantuje stabilność procesu spawania.

Stosując oczyszczanie i teksturowanie powierzchni z wykorzystaniem mikroobróbki laserowej oraz automatyki sterującej (np. stoły sterowane CNC, roboty, głowice Galvo) można precyzyjnie oczyścić trudnodostępne strefy elementów maszyn oraz uzyskać oczekiwane rozwinięcie powierzchni, głównie jej chropowatość. Wstępne próby teksturowania laserowego przeprowadzono na ww. stali. Uzyskiwano zróżnicowane efekty, tj. od lokalnych mikronadtopień ($R_a=2,5-5\mu\text{m}$) do bardzo dużego rozwinięcia powierzchni (rys.4) o wysokiej chropowatości dochodzącej nawet do $15-25\mu\text{m}$. Oczywiście możliwe jest także uzyskanie jeszcze większej chropowatości ale wydaje się, że nie jest to optymalne rozwiązanie, np. w procesach przygotowania powierzchni do klejenia. Aby właściwie dobrać topografię powierzchni, w najbliższej przyszłości planuje się przeprowadzić w WAT szereg eksperymentów w zakresie teksturowania laserowego warstwy powierzchniowej, dążąc do dobrania optymalnych parametrów mikroobróbki laserowej oraz odpowiednich układów geometrycznych powierzchni (R_a , R_z , falistość i inne). Przeprowadzone zostaną również próby badań na ścinanie i odrywanie na próbkach klejonych w warunkach laboratoryjnych. Pozwoli to na dobranie najlepszych wariantów ablacyjnej mikroobróbki laserowej zastosowanej do oczyszczania i teksturowania warstwy powierzchniowej stali AMS 5504.

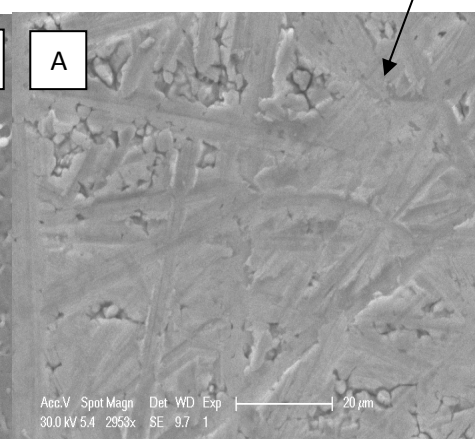
a)



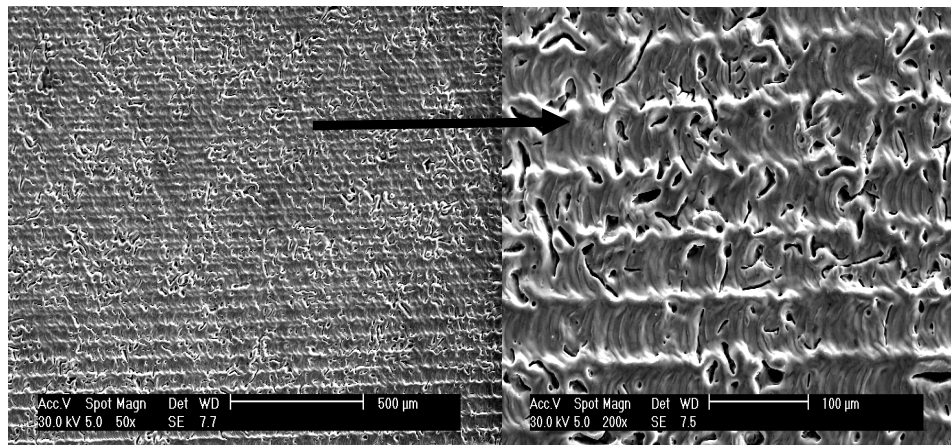
b)



c)



Rys.3. Charakterystyczna topografia warstwy powierzchniowej stali AMS 5504 przed i po oczyszczeniu promieniowaniem laserowym: A – strefa przed oczyszczeniem laserowym, B – strefa po oczyszczeniu laserowym; laser Nd: YAG, $\lambda = 1064\text{nm}$, czas trwania $\tau = 10\text{ns}$, gęstość energii $E = 1\text{ J/cm}^2$, G - granica oczyszczenia laserowego, N- mikroobszary z nadtopieniami powierzchniowymi



Rys. 4. Charakterystyczna topografia warstwy powierzchniowej stali chromowo-niklowej AMS 5504 po teksturowaniu promieniowaniem laserowym

7. WNIOSKI

Istnieje wiele technologii usuwania i czyszczenia powierzchni, ale niewiele z nich spełnia wymogi ekonomiczne i ochrony środowiska. Laserowa obróbka powierzchni spełnia lub przewyższa wymagania stawiane przez elektronikę, przemysł nuklearny, kosmiczny i inżynierię lądową. Trzy typy najczęściej używanych laserów oferują charakterystyczne dla siebie zalety w postaci średnich mocy, pracy impulsowej, długości fali, zdolności do sprzężenia z materiałem obiektu i dostarczania światłowodem.

Systemy laserowe stosowane do oczyszczania i teksturowania warstwy powierzchniowej mogą pracować optymalnie w otoczeniu mokrym i suchym, gdy na powierzchni przepływa ciecz usuwająca zanieczyszczenia. Cząstki zanieczyszczeń są najczęściej związane z powierzchnią wiązaniami kowalencyjnymi, elektrostatycznymi, jonowymi lub Van der Waalsa.

Do usunięcia ściśle przylegających warstw wymagana jest ablacja laserowa. Ablację osiąga się poprzez szok termiczny, topnienie i odparowanie. Usunąć można warstwy farby, tlenków, cienkie warstwy podkładu i inne warstwy organiczne/nieorganiczne. Najważniejsze jest pełne rozpoznanie oddziaływań lasera z materiałem w opracowaniu prawidłowych parametrów procesu. Pomocą w określeniu, jakie zjawisko przeważa (obróbka cieplna, topnienie, odparowanie) jest znajomość absorpcji energii, transferu ciepła i współczynnika odbicia. Metoda ablacyjnego laserowego (bezstykowego) oczyszczania warstw powierzchniowych różnych materiałów konstrukcyjnych i kompozytów ma ogromną przewagę nad metodami stosowanymi dotychczas. Jest ona bardzo skuteczna, a ponadto bezkontaktowa, uniwersalna i bezpieczna dla ludzi i otaczającego środowiska.

Przeprowadzone w WME i IOE WAT badania wstępne ablacyjnego oczyszczania laserowego potwierdziły skuteczność tej metody. Warstwa powierzchniowa stopu stali chromowo-niklowej AMS5504 zawierała szereg zanieczyszczeń typu organicznego i nieorganicznego, głównie tlenków żelaza, chromu i niklu, wynikających z samego procesu walcowania jak również z efektów oddziaływania czynnika ludzkiego. Istotny

wpływ ma przeprowadzone badania miało również środowisko zewnętrzne. Idealnym rozwiązaniem byłoby przeprowadzenie oczyszczania laserowego w próżni lecz jest to metoda bardzo kosztowna. Zazwyczaj stosuje się osłony gazów obojętnych (np. Ar, He) w celu ochrony przed utlenianiem i uzyskania warstwy zabezpieczającej przed korozją powierzchniową.

W wyniku selektywnego oczyszczania laserowego, stosując różne parametry obróbki (gęstości energii, stopień przykrycia) uzyskano zarówno bardzo dobry efekt czystości powierzchniowej, jak również stwierdzono pewne zagrożenia wynikające z powstających nadtopień warstwy powierzchniowej. Nadtopienia te wpływają na rozwinięcie powierzchni, co znacznie poprawia adhezję mechaniczną, np. powłok klejowych, ale może również wpłynąć negatywnie na wytrzymałość zmęczeniową oczyszczanych elementów. Tak więc przy doborze parametrów oczyszczania laserowego należy unikać efektów nadtopień warstwy powierzchniowej, szczególnie w elementach pracujących przy zmiennych obciążeniach mechanicznych i szokach cieplnych.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2007 – 2010 jako projekt badawczy zamawiany PBZ-MNiSW-01/I/2007.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Burakowski T., Wierchoń T.: *Inżynieria powierzchni metali*, WNT, Warszawa 1995.
- [2] Anisimov S.I., Luk'yanchuk B.S.: *Selected problems of laser ablation theory*, Uspekhi Fizyčeskich Institut Nauk, 172, No.3 (2002), s. 301-333.
- [3] Marczak J.: *Analiza i usuwanie nawarstwień obcych z różnych materiałów metodą ablacji laserowej*, ISBN: 83-88442-94-5 (2004).
- [4] Napadłek W.: Sarzyński A., Marczak J.: *Analiza procesów zachodzących podczas ablacji laserowej na stopach aluminium*, Przegląd Spawalnictwa nr 5 – 6 (2006), s. 64 – 67.
- [5] Burakowski T.: Marczak J., Napadłek W.: *Istota ablacyjnego oczyszczania laserowego materiałów*, Prace Instytutu Elektrotechniki, LIII, Zeszyt 228'06 (2006), s. 125 – 135.
- [6] Burakowski T., Napadłek W., Marczak J.: *Ablacyjna mikroobróbka laserowa w areologii*, Inżynieria Materiałowa nr 5 (153), rok XXVII, wrzesień – październik, 2006, s. 882 – 889.
- [7] Burakowski T., Kubicki J., Marczak J., Napadłek W.: *Technologiczne możliwości zastosowania ablacyjnego oczyszczania laserowego materiałów*, Prace Instytutu Elektrotechniki, LIII, Zeszyt 228'06, (2006), s. 137 - 146.
- [8] <http://ptim.simp.pl/ptim/content/view/118/54/> z dnia 12.02.2010
- [9] Wielgołaski W.: *Wszystko o klejeniu, uszczelnianiu i antykorozyji – poradnik serwisowy, 2002-03.*
- [10] Nowacki J., Chudziński M., Zmitrowicz P.: *Lutowanie w budowie maszyn*, WNT 2006
- [11] http://www.agdex.com/grafika/brazetec_lutowanie.jpg z dnia 12.02.2010
- [12] Tasak E., Ziewiec A.: *Spawalność materiałów konstrukcyjnych*, WNT 2009